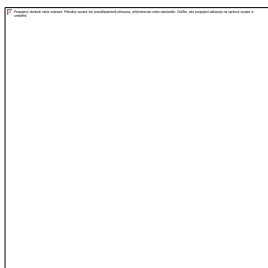


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF BUILDING TESTING

MOŽNOSTI VYUŽITÍ ULTRAZVUKOVÉ IMPULSNÍ METODY VE STAVEBNÍ PRAXI

POSSIBILITIES OF THE ULTRASONIC PULSE METHODS IN CONSTRUCTION PRACTICE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ZUZANA ŠKROBÁNKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAROMÍR LÁNÍK

BRNO 2013




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavebního zkušebnictví


ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Zuzana Škrobánková
Název	Možnosti využití ultrazvukové impulsní metody ve stavební praxi
Vedoucí bakalářské práce	Ing. Jaromír Láník
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2012
Datum odevzdání bakalářské práce	24. 5. 2013

V Brně dne 30. 11. 2012


prof. Ing. Leonard Hobst, CSc.
Vedoucí ústavu




prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

HOBST, Leonard, VÍTEK, Lubomír. Ověřování délky kotevních šroubů v masivních konstrukcích ultrazvukovou metodou. Soudní inženýrství. 2007, roč. 18, č. 2, s. 97 – 99, ISSN 1211 - 443X.

HOBST, Leonard, VÍTEK, Lubomír, LÁNÍK, Jaromír, KOUDELKA, Martin. Možnosti využití ultrazvukové impulsní metody ve stavební praxi. Zkoušení a jakost ve stavebnictví 2009, ISBN 978-80-214-3951-1

OBRAZ, Jaroslav. Ultrazvuk v měřicí technice. SNTL, Praha 1976.

Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Bakalářská práce bude zaměřena na možnosti využití ultrazvukové defektoskopie ve stavebnictví obecně.

Práce bude zaměřena na studium a možnosti využití impulsní odrazové metody pro nedestruktivní diagnostiku ocelových částí nosných konstrukcí ve stavebnictví, např. spoje, kotvy, kotevní desky apod.

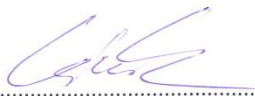
V teoretické části studentka uvede popis, principy a možnosti využití jednotlivých ultrazvukových metod.

Navazující experimentální část bude obsahovat praktické měření pomocí defektoskopu SONIC 1200HR na vybrané části ocelové konstrukce s následným vyhodnocením, které bude zpracováno formou příloh.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



Ing. Jaromír Láník
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na využití ultrazvukové impulsní metody ve stavebnictví. Vysvětluje použití ultrazvukové metody od základních principů až po konkrétní příklady z praxe. V experimentální části se zabývá zjištěním polohy příčných vad na daných zkušebních vzorcích.

Klíčová slova

Ultrazvuková impulsní metoda

Abstract

Bachelor thesis is focused on the use of ultrasonic pulse methods in construction practice. Explains the use of ultrasonic methods from basic principles to specific examples. In the experimental part deals with finding the position of transverse defects of the test samples.

Keywords

Ultrasonic pulse method

Bibliografická citace VŠKP

ŠKROBÁNKOVÁ, Zuzana. *Možnosti využití ultrazvukové impulsní metody ve stavební praxi*. Brno, 2013. 41 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Jaromír Láník.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24.5.2013

.....
podpis autora
Zuzana Škrobánková

Obsah:

1	Úvod.....	8
2	Teoretická část	9
2.2.	Základy Ultrazvuku	9
2.2.1	Kmit, doba kmitu, vlnová délka [1], [2]	9
2.2.2	Druhy vln [1], [2], [11]	11
2.2.3	Odraz a lom [1], [2], [11]	13
2.2.4	Útlum ultrazvukových vln [1], [2], [11]	15
2.2.5	Ultrazvukové sondy [1], [2], [12]	16
2.2.6	Minimální vada lokalizovaná a hodnocená ultrazvukem [2].....	20
2.2.7	Vztahy mezi náhradní velikostí vady D_{KSR} , výškou vadového echa a dB změnou [2]	21
2.3.	Ultrazvuková impulsní metoda.....	21
2.3.1	Ultrazvuková impulsní průchodová metoda.....	21
2.3.2	Ultrazvuková impulsní odrazová metoda [1], [12], [6]	21
2.3.3	Ultrazvukový defektoskop [1], [12]	22
2.3.4	Kalibrační měřky [1]	24
2.3.5	Způsoby prozvučování při použití dvou sond	26
2.3.6	Akustická vazba [1], [10]	26
2.4.	Využití ultrazvukové impulsní metody	27
2.4.1	Měření tloušťky materiálu [1], [4], [5]	27
2.4.2	Měření korozního úbytku	28
2.4.3	Zkoušení svarů.....	29
2.4.4	Měření délky kotevních šroubů	29
3	Experimentální část.....	30
3.2.	Měření.....	30
3.2.1	Zkušební kotevní šrouby	30
3.2.2	Ultrazvukové sondy	33
3.2.3	Ultrazvukový defektoskop a jeho kalibrace	34
3.3.	Výsledky a jejich zpracování.....	35
4	Závěr	40
5	Seznam použité literatury.....	41

1 Úvod

Ultrazvuk je mechanické kmitání částic prostředí s frekvencí vyšší než 20 kHz. Z definice vyplývá, že se zvuk nešíří ve vakuu. Ultrazvuk má stejnou fyzikální podstatu jako zvuk, ale pro lidské ucho je neslyšitelný, někteří živočichové můžou část ultrazvukového spektra vnímat (psi, netopýři, delfini). [2], [10]

Ultrazvuk je využíván v řadě oborů. Již před druhou světovou válkou inspiroval vědce sonar, zařízení vysílající pod vodou zvukové vlny a sledující vracející se echa, jejichž prostřednictvím docházelo k identifikaci ponořených objektů, k využití této koncepce v medicíně. V letech 1929 – 1935 studoval Sokolov využití ultrazvukových vln k detekci kovových předmětů. Mulhauser získal v roce 1931 patent k používání ultrazvukových vln, využívajících dvou snímačů k detekci vad v pevných lákách. Firestone a Simons vyvinuli pulsní ultrazvukovou kontrolu, využívající pulsní – echo metodu. Po druhé světové válce začali výzkumníci v Japonsku zkoumat využití ultrazvuku v oblasti lékařské diagnostiky. Až do padesátých let byla práce japonských vědců pro Evropu i Spojené státy neznámá. Průkopníci ultrazvuku ve Spojených státech přispěli v dalších desetiletích k novým objevům a vylepšením v oblasti ultrazvuku. [10]

Rychlý vývoj využití ultrazvuku nadále pokračuje. Dochází k zlepšování metod, postupů, měřících přístrojů a tím také k přesnějším výsledkům. V dnešní době je nejvíce využíván ultrazvuk v medicíně a dále v průmyslových oblastech jako je stavebnictví a strojírenství. Využívá se například pro měření tloušťky materiálu, kontrola homogenity, čištění vzduchu, sterilizace vody, mléka, k promíchávání galvanických lázní, k čištění předmětu, rozpouštění kovů apod. Zájem se netýká již jen oblastí detekce, charakterizace a odhad velikosti defektů, ale i charakterizace materiálů. Oblast využití je velmi široká a s dalším zdokonalením technologií dojde i k zdokonalení používání ultrazvuku. [10]

Cílem bakalářské práce Možnosti využití ultrazvukové impulsní metody ve stavební praxi je seznámit s všeobecnými teoretickými znalostmi z oblasti ultrazvuku a poté i s jednotlivými možnostmi využití ve stavebnictví. V experimentální části této práce bude ověřeno, zda teoretické poznatky této metody opravdu platí v praxi.

2 Teoretická část

2.2. Základy Ultrazvuku

Ultrazvukem rozumíme kmitání částic s frekvencí větší jak 20 kHz, pod frekvencí 20 kHz do frekvence 20 Hz se jedná o slyšitelný zvuk a kmitání částic s frekvencí pod 20 Hz se nazývá infrazvuk. [2]



Obr. 1 Znázornění hranic mezi ultrazvukem, zvukem a infrazvukem

2.2.1 Kmit, doba kmitu, vlnová délka [1], [2]

Kmitání dělíme na tlumené a netlumené, základem kmitání je kmit. Tlumené kmitání je takové, při kterém se spotřebovává energie soustavy a amplituda (maximální výchylka) klesá. Při netlumeném kmitání musíme energii soustavě dodávat kvůli překonání odporu prostředí a amplituda je konstantní. Jestliže působíme na kmitající soustavu vnější silou (budící síla) jedná se o buzení. Tohoto principu se využívá v ultrazvukové defektoskopii. Kmitu, při kterém používáme budící sílu, se říká impuls.

Kmitání je definováno následujícími veličinami

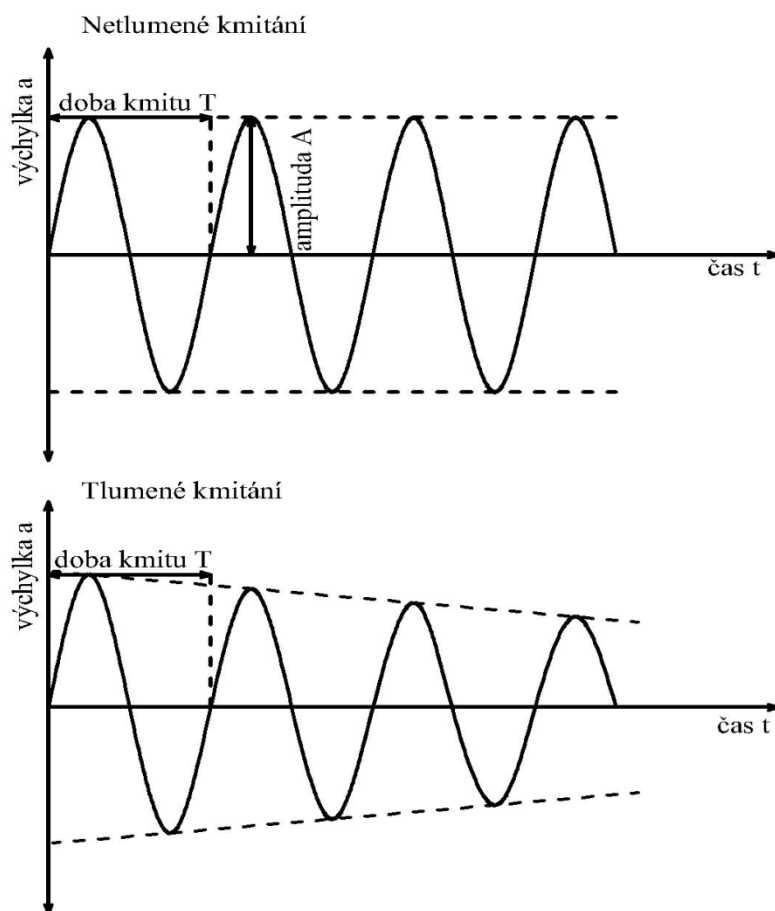
- dobou kmitu (perioda) T
- vlnovou délkou λ
- frekvencí f

Mezi dobou kmitu T a frekvencí f platí následující vztah:

$$T [s] = \frac{1}{f [\text{Hz}]} \quad (1)$$

V ultrazvukové defektoskopii se častěji používá vztah:

$$T [\mu s] = \frac{1}{f [MHz]} \quad (2)$$



Obr. 2 Tlumené a netlumené kmity

V praxi nás nezajímá doba kmitu, ale vlnová délka. Době jednoho kmitu odpovídá dráha ultrazvuku jedné vlnové délky λ . Mezi vlnovou délkou a dobou kmitu platí vztah, který je vyjádřen s jednotkami pro použití v ultrazvukové defektoskopii.

$$\lambda [mm] = c [km/s] \cdot T [\mu s] \quad c - \text{rychlost šíření vln}$$

$$\lambda [mm] = \frac{c [km/s]}{f [MHz]} \quad (3)$$

Rychlost šíření ultrazvuku je materiálová konstanta, která je dána pružnostními konstantami materiálů: E = modul pružnosti v tahu, G = modul pružnosti ve smyku, μ = Poissonovo číslo a ρ = měrná hmotnost.

2.2.2 Druhy vln [1], [2], [11]

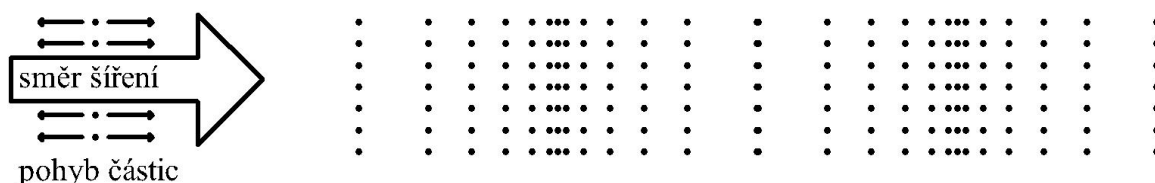
Ultrazvukové vlny dělíme

- Podle tvaru vlnoplochy
- Podle směru kmitání částic prostředí vzhledem ke směru šíření vlny

Podle tvaru vlnoplochy rozlišujeme vlny kulové, které mají vlnoplochu ve tvaru koule a jejich zdrojem je kmitající bod. Dále máme vlny válcové, jejich zdrojem je kmitající přímka nebo válec a vlny rovinné, jejichž zdrojem je kmitající deska.

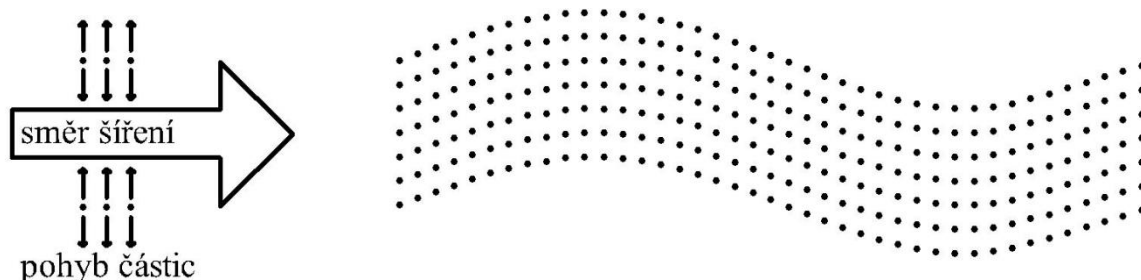
Vlny dělené podle směru kmitání částic prostředí vzhledem ke směru šíření jsou podélné, příčné, povrchové, deskové a Loveovy vlny.

U podélných vln částice kmitají ve směru šíření vlny. Podmínkou pro šíření podélných vln je dostatečný rozměr tělesa vzhledem k délce vlny. Podélné vlny se šíří v kapalném, tuhém a plynném prostředí, šíří se nejrychleji z uvedených druhů vln.



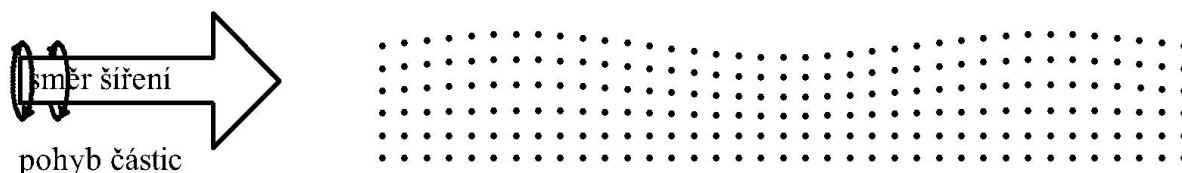
Obr. 3 Podélné vlny

U příčných vln částice kmitají kolmo na směr šíření vlny. Šíří se pouze v tuhém prostředí s mnohem většími rozměry než je délka vlny. Materiál, ve kterém se příčná vlna šíří musí přenášet smyková napětí tj. $G \neq 0$ a je oproti podélné vlně pomalejší. Vlny jsou polarizované, šíří se v rovině, kterou tvoří osa ultrazvukové vlny a směr kmitání částic.



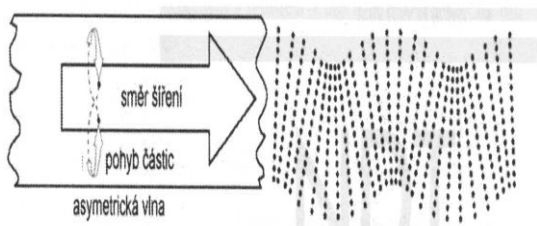
Obr. 4 Příčné vlny

U povrchových vln (Rayleighovy) jsou kmity prostředí složeny ze dvou vektorů a to z vektoru kolmého na směr šíření (příčného) a vektoru ve směru šíření vln (podélného). Vektor kolmý na směr šíření je mnohem větší velikost než vektor ve směru šíření. Složením těchto vektorů dostaneme výsledný pohyb částic, který probíhá po velmi protáhlé elipse. Tyto vlny jsou pomalejší než příčné vlny a je mezi nimi daná závislost vztahem $c_R = 0,93 \cdot c_T$, kde c_T je rychlost příčné vlny a c_R je rychlost povrchové vlny. Šíří se pouze v prostředí tuhém.

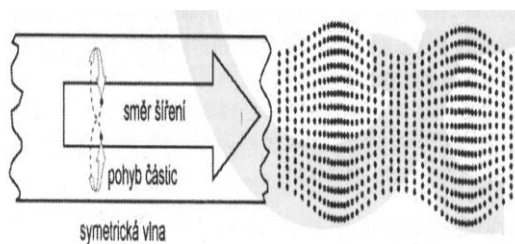


Obr. 5 Povrchové vlny (Rayleighovy)

Deskové vlny (Lambovy) dělíme na symetrické (dilatační) a asymetrické (ohybové). V defektoskopii se používají pro kontrolu plechů. U symetrických vln kmitají částice prostředí na neutrální ose podélně a na povrchu po elipse. Můžeme si ji představit jako protlačování ocelové koule hadicí. U asymetrických vln kmitají částice prostředí na neutrální ose příčně a na povrchu po elipse a představit si ji můžeme jako pohyb hada. Pro používané frekvence v defektoskopii mají jako jediné vlny proměnlivou rychlost šíření, ta závisí na součinu frekvence f a tloušťce desky d u tyčových prvků na průměru tyče d . Šíří se v prostředí, kde jeden nebo dva rozměry jsou srovnatelné se délkou vlny a šíří se celým průřezem.



Obr. 6 Asymetrická vlna [11]

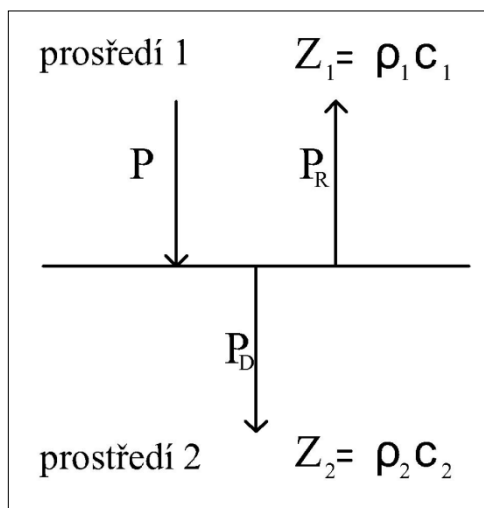


Obr. 7 Symetrická vlna [11]

2.2.3 Odraz a lom [1], [2], [11]

Ultrazvuková vlny se v homogenním prostředí šíří přímočaře, v případě dopadu vlny na rozhraní dvou prostředí dochází obecně k lomu, odrazu a transformaci vlny. V defektoskopii rozlišujeme řešení podmínek šíření vlny rozhraním podle úhlu dopadu ultrazvukové vlny na rozhraní dvou prostředí na kolmý dopad a šikmý dopad. [1]

U kolmého dopadu ultrazvukové vlny na rozhraní dvou prostředí dochází k odrazu a průchodu vlny rozhraním. Dopadající akustický tlak se pak dělí na tlak odražený P_R a tlak prošlý P_D . Poměr P_R a P_D je závislý na akustických vlnových odporech (impedancích) prostředí Z_1 a Z_2 . [1]



Obr. 8 Kolmý dopad

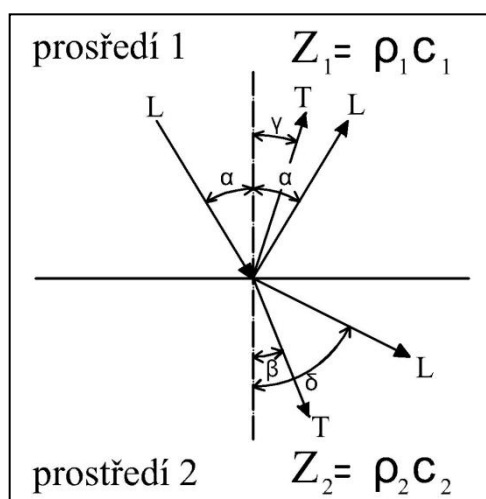
Poměr akustického tlaku odražené vlny P_R a vlny dopadající P na rozhraní prostředí nám vyjadřuje koeficient odrazu R . Poměr akustického tlaku prošlé vlny P_D a vlny dopadající P na rozhraní prostředí nám vyjadřuje koeficient průchodu. Tyto poměry můžeme vyjádřit pomocí vlnových odporů prostředí. [1], [2]

$$R = \frac{P_R}{P} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$
$$D = \frac{P_D}{P} = \frac{2 Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (4)$$

$$D = 1 + R \quad (5)$$

Z uvedených vztahů vyplývá, že čím větší je rozdíl mezi akustickými vlnovými odpory, tím větší je koeficient odrazu, to znamená pro praxi lepší lokalizování vady. Například u oceli, která má $Z \approx 45$ se lépe lokalizuje vada vyplněná vzduchem $Z \approx 0$ než vada vyplněná vodou $Z \approx 1,5$. A čím menší je rozdíl mezi akustickými vlnovými odpory tím menší je koeficient průchodu, více akustického tlaku projde do druhého prostředí a tím je vada hůře lokalizována.

U šikmého dopadu ultrazvukové vlny na rozhraní dvou prostředí dochází k odrazu, lomu a transformaci na rozhraní prostředí v závislosti na úhlu dopadu ultrazvukové vlny na rozhraní prostředí a na rychlosti šíření vlny v prostředích. Lom ultrazvukové vlny je změna směru šíření vlny vzhledem ke směru dopadající vlny. V tuhém prostředí mohou být obecně lomené a odražené vlny pouze vlny podélné nebo příčné. V praxi pro defektoskopii mají význam pouze vlny podélné a ty budou v textu dále rozebrány.



Obr. 9 Šikmý dopad

Na obr. 6 je vidět, že při šikmém dopadu ultrazvukové vlny na rozhraní dvou prostředí vznikají 4 vlny. Dopadající podélná vlna L pod úhlem α se odráží zpět do prostředí 1 pod stejným úhlem α (úhel dopadu = úhel odrazu) a transformuje se na příčnou vlnu T, která se odráží pod úhlem γ . Dále se šíří do prostředí 2 jako podélná vlna pod úhlem δ a transformuje na příčnou vlnu T, která se šíří v prostředí 2 pod úhlem β . Podmínky na rozhraní se vyjádří pomocí Snellova zákona:

$$\frac{\sin \alpha}{c_{1L}} = \frac{\sin \gamma}{c_{1T}} = \frac{\sin \delta}{c_{2L}} = \frac{\sin \beta}{c_{2T}}$$

Jestliže při šikmém dopadu podélné vlny na rozhraní dvou prostředí se nechá zvětšujícím se úhlem podélná vlna vymizet v druhém prostředí, pak úhel, který svírá

dopadající podélná vlna s normálou v místě dopadu, se nazývá první kritický úhel. Příčná vlna v 2 prostředí zůstává. První kritický úhel vyjádříme jako:

$$\sin \alpha_1 = \frac{c_{L1}}{c_{L2}} \quad (6)$$

Druhý kritický úhel nastává, jestliže se nechá zvětšujícím se úhlem dopadu vymizet z prostředí 2 příčná vlna. Vztah je dán jako:

$$\sin \alpha_2 = \frac{c_{L1}}{c_{T2}} \quad (7)$$

Při dalším zvětšování úhlu dopadu vznikne v prostředí 2 povrchová vlna a to je třetí kritický úhel vyjádřený vztahem:

$$\sin \alpha_3 = \frac{c_{L1}}{c_{R2}} \quad (8)$$

Překročením třetího kritického úhlu zůstává veškerá energie v prostředí 1.

2.2.4 Útlum ultrazvukových vln [1], [2], [11]

Každá ultrazvuková vlna, která prochází prostředím je v závislosti na akustických vlastnostech tohoto prostředí zeslabována, tj. vlivem absorpce a rozptylu. Útlum ultrazvukových vln se značí κ , útlum absorpcí je pak κ_A a útlum rozptylem κ_R . Součtem útlumu absorpcí κ_A a útlumu rozptylem κ_R získáme celkový útlum κ .

Absorpce ultrazvukové energie převládá při nízkých frekvencích, kdy se mechanická energie mění na tepelnou. Útlum absorpcí je vyjádřen vztahem následujícím vztahem, kde a_A je konstanta absorpce.

$$\kappa_A = f \cdot a_A \quad (9)$$

Rozptyl převládá při vyšších frekvencích v oblasti MHz v této oblasti je vlnová délka malá a dochází na rozhraní zrna k odrazu, lomu a transformaci vlnění podlé úhlu dopadu vlny na rozhraní zrn. Energie vlny v původním směr klesá v důsledku toho, že se ultrazvuk šíří do různých směrů. Rozlišujeme tři typy rozptylů – Rayleigho, stochastický a difuzní. Rayleigho rozptyl při zvyšujících se frekvencích přechází ve stochastický rozptyl a ten dále přechází v difuzní. V defektoskopii využíváme pro ocel Rayleigho rozptyl, protože se běžně pracuje v rozsahu frekvencí 0,5 MHz až 5 MHz. Pro Rayleigho útlum rozptylem κ_{RR} platí následující vztah, kde a_{RR} je konstanta Rayleigho rozptylu a d_{ST} je střední rozměr zrna oceli.

$$\kappa_{RR} = a_{RR} \cdot f^4 \cdot d_{ST}^3 \quad (10)$$

2.2.5 Ultrazvukové sondy [1], [2], [12]

Ultrazvuková sonda je elektroakustické zařízení, které obsahuje jeden nebo více měničů pro transformaci elektrické energie na mechanickou a naopak (vysílač/přijímač).

2) Podle typu

- Přímá
- Úhlová
- Dvojitá
- Zvláštní

3) Podle podmínek měření

- Kontaktní
- Imerzní

4) Podle tvaru měniče

- Kruhový
- Půlkruhový
- Pravoúhelníkový

5) Podle druhu měniče

- Piezoelektrické (100 kHz až 25MHz)
- Magnetostrikční (20 kHz až 100 kHz, v defektoskopii používané minimálně)

6) Podle počtu měničů

- Jednoměničové
- Dvouměničové (dvojité)

V klasické defektoskopii se využívá sond s piezoelektrickým měničem o tloušťce d_m rovné polovině vlnové délky podélné vlny v měniči. Například sonda B2S Krautkrämer o jmenovité frekvenci $f = 2 \text{ MHz}$, vysílá do oceli podélné vlny, má měnič z bariumtitanátu, ve kterém je rychlost podélné vlny $c_L = 5200 \text{ m/s}$, vlnová délka $\lambda = 2,6 \text{ mm}$ a tloušťka měniče je

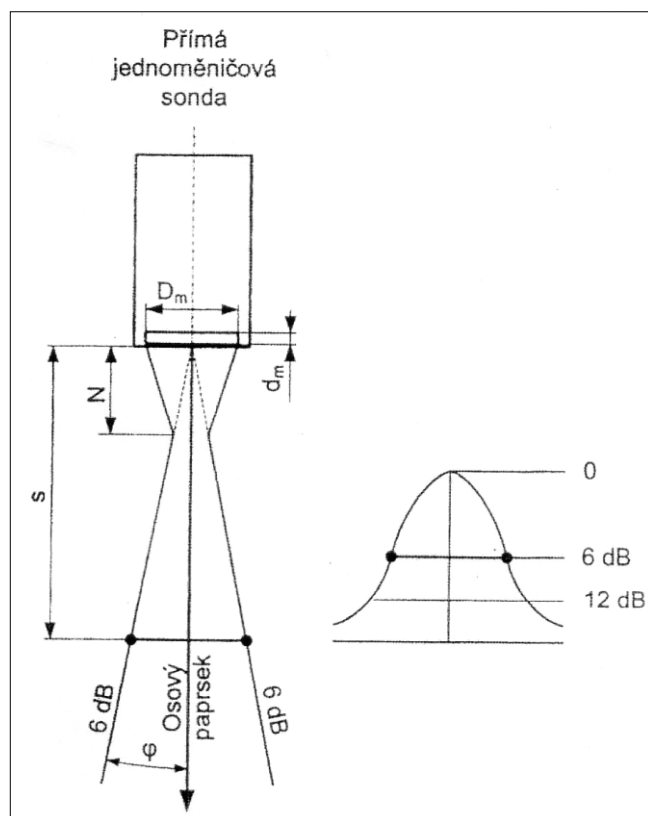
$d_m = 1,3 \text{ mm}$. S rostoucí frekvencí klesá tloušťka měniče. Piezoelektrickým měničem bývá destička ve tvaru kruhu nebo obdélníku, jejíž body na povrchu kmitají se stejnou fází a amplitudou. Čím je měnič tenčí, tím je frekvence vzniklého kmitání větší. Piezoelektrické měniče se vyrábí z látek s přirozenými piezoelektrickými vlastnostmi (křemen, turmalín), z umělých krystalů (lithiumsulfát, niobát olova) nebo z umělých polykrytalických feroelektrik.

V následujícím textu budou blíže popsány sondy podle různých hledisek dělení, které byly popsány na začátku textu o ultrazvukových sondách.

Kontaktní sondy se pokládají přímo na povrch zkoušeného tělesa. Protože dochází k přímému kontaktu měniče s povrchem zkoušeného tělesa, který bývá často drsný, musí být měnič sondy opatřen ochranou folií nebo destičkou z materiálu, který odolává opotřebení. Dále se musí použít vazební prostředek mezi sondou a zkušebním povrchem a to z důvodu, že se ultrazvuk ve vzduchu hned utlumí. Vazebním prostředkem může být olej, voda, vazelína apod.

Imerzní sondy se využívají pro bezkontaktní zkoušení. Mezi povrchem zkoušeného tělesa a měničem je sloupec vazebního materiálu, nejčastěji vody nebo řídkého oleje. U tohoto druhu sond nejsou měniče chráněné proti opotřebení, ale pouze proti vniknutí vazebního materiálu. Jestliže by se tyto sondy používaly jako kontaktní, došlo by brzy k jejich zničení.

Přímé sondy jsou nejpoužívanější a nejvýkonnější, vyrábějí se v mnoha typech a tvarech v závislosti na jejich použití. Přímá sonda má jeden měnič pro vysílání nebo přijímání akustických vln. Měnič vysílá podélné ultrazvukové vlny do zkoušeného tělesa a to kolmo k jeho povrchu. Používají se například pro měření tloušťky a mohou být imerzní nebo kontaktní. Velice málo se využívá měniče, který vysílá příčné ultrazvukové vlny do zkoušeného tělesa. Tyto sondy se používají pro měření rychlosti nebo útlumu příčných vln v materiálu. Na obr. 10 je vyobrazena jednoduchá jednoměničová přímá sonda. Důležitá je vzdálenost N , která je nazývána délka blízkého pole, kde je svazek nejužší a akustická energie je soustředěna do nejmenší plochy. Jedná se o poslední maximum akustického tlaku na ose svazku. Délka blízkého pole N je měřena od měniče.



Obr. 10 Přímá sonda [2]

$$N = \frac{D_{ef}^2 \cdot f}{4 \cdot c_L} \quad (11)$$

Kde:

D_{ef} efektivní průměr měniče $D_{ef} = 0,97 \cdot D_m$

D_m jmenovitý průměr měniče

f jmenovitá frekvence sondy

c_L rychlost šíření podélných vln

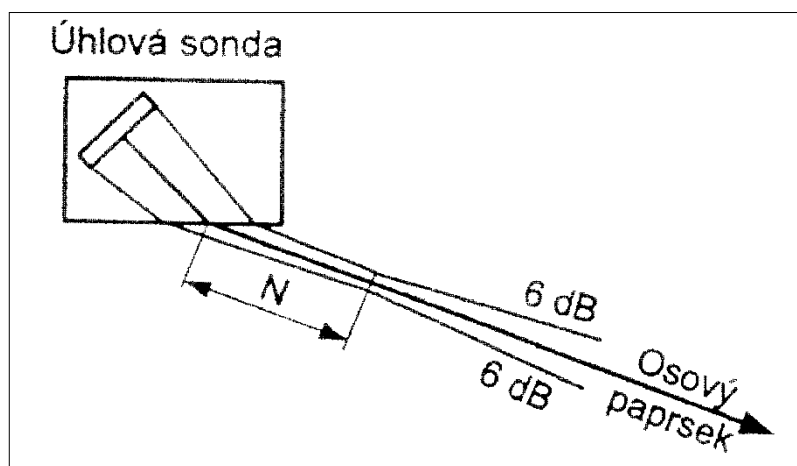
Vzdálenost větší než N je nazývána vzdálené pole. Z obr. 10 je patrné, že se svazek rozevívá a akustická energie se šíří větší plochou a zeslabuje. Rozevření svazku se nezahrnuje do útlumu, protože je vlastností sondy. Poloviční úhel rozevření $\varphi_{-6 \text{ dB}}$ se vypočítá podle vztahu

$$\sin \varphi = 0,5 \cdot \frac{c_L}{f \cdot D_{ef}} \quad (12)$$

Na obr. 7 je dále ve vzdálenosti s , zobrazen průběh akustického tlaku. Maximum akustického tlaku P_1 je ve vzdáleném poli na ose svazku a krajní paprsky jsou vymezeny poklesem akustického tlaku na polovinu P_2 , vyjádřeno v dB poklesem akustického tlaku o 6 dB. Tento

pokles na poloviční výšku echa (odraženého signálu) je nejvhodnější pro mapování plochy vad, protože je polovina sondy mimo vadu a osa sondy je na kraji vady. Přesněji se dá velikost vady mapovat, jestliže se předem změří mezní pokles vadového echa pro danou sondu a typ vady na etalonu, při kterém se vada zobrazí přibližně skutečnou velikostí.

Úhlové sondy vysílají ultrazvukový svazek do zkoušeného tělesa pod úhlem. Úhlové sondy můžeme dělit na úhlové sondy podélných vln a úhlové sondy příčných vln. Požadovaného typu vlny ve zkoušeném materiálu dosáhneme vlnovou transformací podélné vlny dopadající pod určitým úhlem na rozhraní. Vyrábějí se pro kontaktní i imerzní zkoušení. U kontaktního zkoušení je úhel dopadu určen úhlem plexi klínu a u imerzního zkoušení nakloněním sondy. Úhlové sondy podélných vln pracují pod 1. kritickým úhlem, což znamená, že se v materiálu šíří podélná i příčná složka vlnění. Ke zkoušení je využívána pouze podélná složka vlnění, proto se využívají úhlové sondy podélných vln pro materiály s vysokým útlumem (šedá litina, plasty, kompozity), ve kterých se příčné vlny utlumí a materiál je prozvučován pouze podélnými vlnami. Úhlové sondy příčných vln pracují mezi 1. a 2. kritickým úhlem. Do zkoušeného materiálu vstupuje po transformaci podélných vln na rozhraní pouze složka příčného vlnění. Vyrábějí se s úhly lomu až do 90° . Úhlové sondy příčných vln s 90° se využívají pro zkoušení povrchových vln (Rayleigho).



Obr. 11 Úhlová sonda [2]

Na obr. 11 je vyobrazena úhlová sonda kde část označená N se nazývá blízké pole a oblast větší než N se nazývá pole vzdálené, podrobněji vysvětleno u přímých sond. Poslední maximum akustického tlaku na ose svazku je ve vzdálenosti N^* měřené od měniče. Pro dráhu v sondě (plexiskle. $c_L = 2730$ m/s) přepočítanou na rychlost šíření příčných vln ve zkoušené materiálu je podle následujícího vztahu.

$$N^* = \frac{D_{ef}^2 \cdot f}{4 \cdot c_T} \quad (14)$$

Pro sondy s kruhovým měničem pak platí, že vzdálenost blízkého pole ve zkoušeném materiálu je dle následujícího vztahu.

$$N = N^* - s_V$$

Kde s_V je dráha ultrazvuku v sondě (v klínu z plexiskla) přepočtená na rychlost šíření příčných vln ve zkoušeném materiálu.

Dvojitě sondy mají oddělený vysílač a přijímač a jsou určeny pro měření v malé hloubce pro lokalizaci vad i pro měření tloušťky. Dvojitě sondy mohou být přímé i úhlové.

Zvláštní sondy jsou zkonstruované pro speciální účely kontroly. Mohou to být například sondy pro vysoké teploty.

2.2.6 Minimální vada lokalizovaná a hodnocená ultrazvukem [2]

Minimální vada, kterou je možno zjistit ultrazvukem musí mít odstup od úrovně šumu 6 dB, což znamená dvojnásobnou výšku echa. Doporučený odstup je 12 dB. Pro úroveň šumu výšky 20 % rastru, je nejnižší úroveň pro hodnocení vad (registrační úroveň) 40 % rastru. Pro šum 40 %, který není způsoben vadami, ale strukturou materiálu, je pak nejnižší úroveň monitoru pro hodnocení vad (registrační úroveň) 80 % rastru obrazovky. Pro snížení na 40 % se musí zesílení zmenšit o 6 dB a tím se úroveň šumu sníží na 20 % rastru při zachování nominálního odstupu vadových ech od šumu 6 dB.

Posouzení reálnosti měření s odstupem od šumu 12 dB se provádí na etalonu, který musí být bez přirozených vad, pouze s umělou vadou. Tento etalon je určen pro posouzení, zda je reálné při přidat 12 dB k nastavení správného zesílení pro hodnocení vad. V poloze pro maximální vadové echo od náhradní vady nebo umělé vady se výška echa nastaví na 40 % rastru a úroveň šumu musí být maximálně 10 % rastru.

Posouzení reálnosti měření s odstupem šumu 6 dB se provádí na etalonu. Tento etalon je určen pro posouzení, zda je reálné přidat 6 dB k nastavení správného zesílení pro hodnocení vad. V poloze pro maximální vadové echo od náhradní vady nebo umělé vady se výška echa nastaví 40 rastru a úroveň šumu musí být maximálně 20 % rastru.

2.2.7 Vztahy mezi náhradní velikostí vady D_{KSR} , výškou vadového echa a dB změnou [2]

Za náhradní vadu považujeme válcový vývrt s rovinným dnem, osa vývrtu je totožná s osou ultrazvukového svazku. Náhradní velikost vady je průměr vývrtu, značí se D_{KSR} , řada náhradních velikostí vad $D_{KSR} = \dots - 0,5 - 0,7 - 1 - 1,4 - 2 - 2,8 - 4 \text{ mm} \dots$. Mezi sousedními náhradními velikostmi vad v řadě náhradních velikostí je rozdíl 6 dB, který odpovídá dvojnásobné nebo poloviční ploše vady. Plocha vady je plocha rovinného dna válcového vývrtu, tedy odrazová plocha vady. Náhradní vada $D_{KSR} = 0,7 \text{ mm}$ má poloviční plochu než náhradní vada $D_{KSR} = 1 \text{ mm}$ a dvojnásobnou plochu než náhradní vada $D_{KSR} = 0,5 \text{ mm}$. Náhradní vada $D_{KSR} = 0,7 \text{ mm}$ má poloviční výšku echa než náhradní vada $D_{KSR} = 1 \text{ mm}$ a dvojnásobnou výšku echa než náhradní vada $D_{KSR} = 0,5 \text{ mm}$.

2.3. Ultrazvuková impulsní metoda

Z velké škály metod, které se využívají k zjišťování vad a poruch ve stavebních konstrukcích, se v poslední době rozvíjí ultrazvuková impulsová metoda. Velkou výhodou této metody je minimální poškození zkoušeného tělesa a získání velkého množství informací o zkoušeném tělese, co se týče vad a jeho struktury. Navíc lze měření opakovat při změně prostředí, času a vnějších vlivů na zkoumanou konstrukci. [1], [12]

2.3.1 Ultrazvuková impulsní průchodová metoda

Principem této metody je měření ultrazvukové energie, která projde zkoušeným materiálem. Ultrazvukové vlny jsou do zkoušeného materiálu vysílány vysílací sondou a na druhé straně přijímány sondou přijímací. Měřicí přístroj registruje rozdíl mezi akustickou energií vysílanou vysílačem a přijaté po průchodu prostředím přijímačem a měří dobu průchodu. Průchodová metoda většinou využívá podélné vlny a to umožňuje použití kapalné akustické vazby. Hlavní výhodou je jednoduchost průchodové metody. Nevýhodou je malá citlivost. Využívá se v případě, kdy potřebujeme zjistit mechanicko-fyzikální charakteristiky či jakost zkoušeného prostředí z rychlosti šíření ultrazvukového vlnění. [1], [12]

2.3.2 Ultrazvuková impulsní odrazová metoda [1], [12], [6]

Tato metoda je v dnešní stavební praxi nejpoužívanější ze všech metod ultrazvuku, protože poskytuje nejvíce informací o zkoušeném předmětu a vadě. Nevýhodou této metody

je použití složitějších přístrojů. Ultrazvuková impulsová metoda využívá principu průchodu ultrazvukového impulsu zkoušeným materiálem. Impuls se na rozhraní dvou prostředí (např. zkoušený materiál a vada) odrazí a vrátí se zpět. Při zkoušení materiálu může být použita jedna nebo dvě ultrazvukové sondy. Jestliže se použijí dvě sondy, jedna funguje jako budič mechanických impulsů a druhá jako snímač. Snímač mění mechanické vlnění na elektrický obraz. Jedna sonda se přikládá na povrchu zkoušeného prvku, ze začátku funguje jako budič, vyšle do materiálu mechanický impuls a poté se přepne na snímání, takže funguje jako snímač, který po příchodu odražené vlny od protějšího povrchu vzorku nebo vady, ji přemění na elektrický obraz a zobrazí jako echo na obrazovce defektoskopu. Využití jedné sondy je výhodné v případě, kdy jsou konstrukce přístupná jen z jednoho povrchu. Nehodí se pro materiály s velkým útlumem a pro heterogenní hmoty jako je beton, proto se ve stavebnictví pro zkoušení betonů používají dvě sondy.

Použití impulsní odrazové metody

- Zjišťování vad ve zkoušeném materiálu nebo výrobku
- Měření vzdáleností vad
- Měření tloušťky
- Měření útlumu
- Měření rychlosti šíření ultrazvuku v prostředí
- Zjišťování elastických konstant prostředí
- Speciální měření

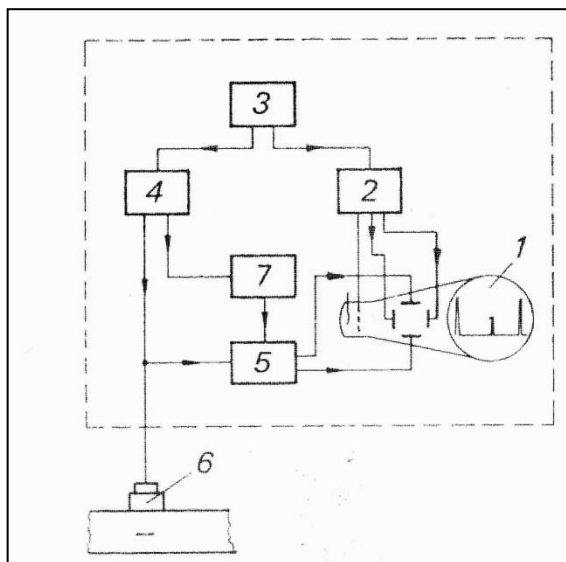
2.3.3 Ultrazvukový defektoskop [1], [12]

V současné době se vyrábějí pro zkoušení ultrazvukem pouze digitální ultrazvukové přístroje, ale analogové přístroje jsou ještě stále používány. Impulsový ultrazvukový přístroj (defektoskop) se skládá z následujících hlavních částí.

- Obrazovka
- Zdroj časové základny
- Synchronizátor
- Generátor impulsů
- Zesilovač
- Sondy

- Obvod pro řízení citlivosti zesilovače

Na obr. 12 je vyobrazen impulsový ultrazvukový přístroj z jednotlivých výše jmenovaných částí.

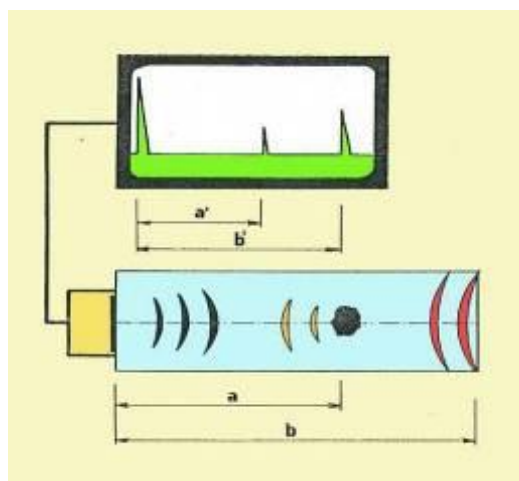


Obr. 12 Základní zapojení ultrazvukového přístroje

[1]

1 – obrazovka, 2 – časová základna, 3 – synchronizátor, 4 – generátor impulsů, 5 – zesilovač, 6 – sonda, 7 – řízení citlivosti

Princip kontroly pomocí ultrazvukového defektoskopu je založen na pravidelném a opakujícím se vysílání impulsů pomocí ultrazvukové sondy do zkoušeného vzorku. V tomto materiálu se vyslaný impuls šíří rychlostí danou materiálem zkoušeného vzorku, např. pro ocel $c_L = 5900 - 6000$ m/s. Při dopadu impulsu na vadu či na protější stranu zkoušeného vzorku, se impuls odrazí zpět se sníženou energií a je zaznamenán ultrazvukovou sondou. Po elektronickém zesílení se zobrazí na obrazovce ultrazvukového defektoskopu. Při správné kalibraci ultrazvukového defektoskopu, je pak doba od vyslání impulsu až po návrat do ultrazvukové sondy přímo úměrná vzdálenosti zjišťované vady či protilehlé strany zkoušeného vzorku.



Obr. 13 Schéma činnosti ultrazvukového defektoskopu [8]

Při výběru ultrazvukového defektoskopu pro zkoušku dané konstrukce musíme zohlednit řadu faktorů:

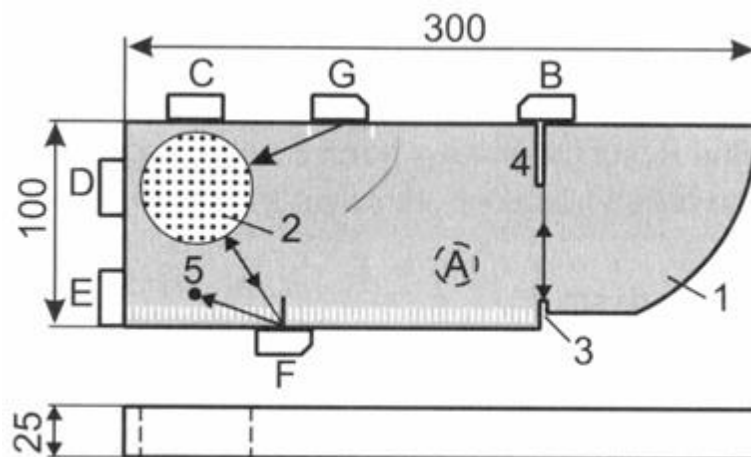
- Citlivost a výkon přístroje
- Frekvenční rozsah
- Vlastnosti časové základny
- Vlastnosti zesilovače
- Rozlišovací schopnost
- Způsob zobrazení
- Rozměry a hmotnost

2.3.4 Kalibrační měrky [1]

Kalibrační měrky slouží pro kalibraci a ověření činnosti ultrazvukových přístrojů a sond. Základní měrkou pro ultrazvukovou impulsový přístroj je kalibrační měrka s označením kalibrační měrka č. 1. Její přesné specifikace se nacházejí v normě ČSN EN ISO 2400. Kalibrační měrka má přesně definované parametry jako jsou rozměry, materiál a jakost povrchu. Kalibrační měrka č 1 je vyobrazena na obr 12. Časovou základnu lze kalibrovat pomocí tloušťky. Mrtvé pásmo sondy tj. hloubka pod povrchem materiálu ve které nelze indikovat žádné vady, se ověřuje na základě odrazu od válce 2 nebo otvoru 5 přikládáním do bodu C, D, E a F viz obr 12.

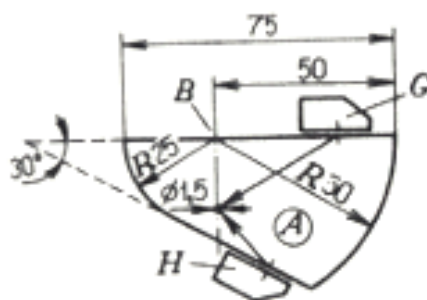
Kalibrační měrka č. 1 je vyrobená z oceli s parametry

- rychlost šíření podélný vln $c_L = 5920 \pm 30 \text{ m/s}$
- rychlost šíření příčných vln $c_T = 3255 \pm 30 \text{ m/s}$
- útlum $\alpha = 0,05 \text{ dB mm}^{-1}$ při 6 MHz
- hustota $\rho = 7,85 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$



Obr. 14 Kalibrační měrka č. 1 [10]

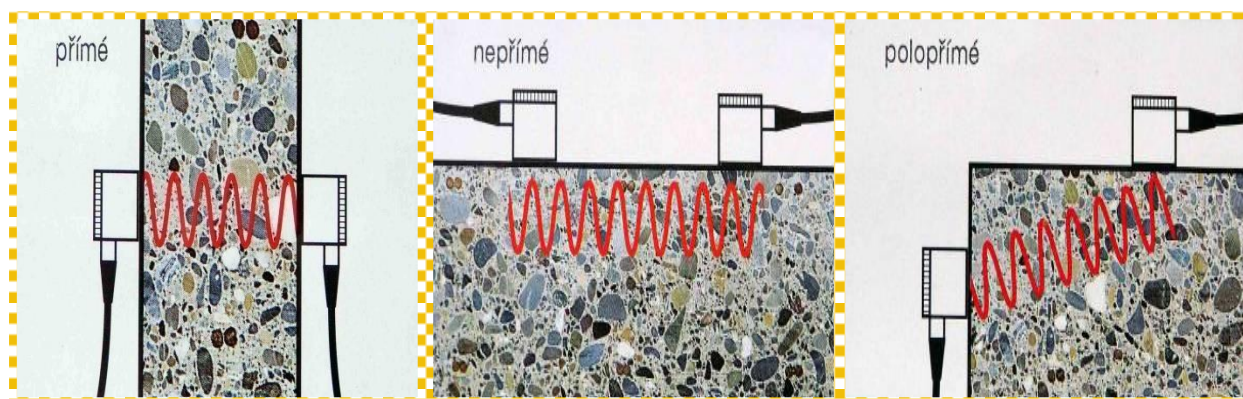
Dále se využívá kalibrační měrky č. 2, která je daleko menší, lehčí a její tvar je jednodušší, ale nemá tak velký rozsah použití jako kalibrační měrka č. 1. Je nevhodná pro úplnou kontrolu ultrazvukového přístroje. Kalibrační měrka č. 2 je vyrobena rovněž z oceli se stejnými parametry jako má kalibrační měrka č. 1. Přesnou specifikaci kalibrační měrky č. 2 uvádí norma ČSN EN ISO 7963.



Obr. 15 Kalibrační měrka č. 2 [10]

2.3.5 Způsoby prozvučování při použití dvou sond

Způsob jak budeme zkoušenou konstrukci prozvučovat je závislý na přístupnosti konstrukce. Jestliže je konstrukce přístupná z obou stran a sondy můžeme umístit proti sobě v jedné ose, jedná se o prozvučování přímé. Pokud jsou sondy umístěné na přilehlých stranách konstrukce, jedná se o prozvučování polopřímé. O polopřímém prozvučování hovoříme také v případě, kdy jsou sondy na protilehlých stranách avšak ne přímo proti sobě. Poslední možností je prozvučování nepřímé, sondy jsou umístěné na stejné straně konstrukce. Nepřímé prozvučování volíme pouze v případě, jestli není možné polopřímé nebo přímé prozvučování. Přímé prozvučování je nejvýhodnější.



Obr. 16 Způsoby prozvučování

2.3.6 Akustická vazba [1], [10]

Akustická vazba je prostředí, ve kterém se převedou ultrazvukové vlny z měniče do zkoušeného materiálu a naopak. Špatnou volbou akustické vazby může nepříznivě ovlivnit výsledky měření. Rozeznávají se tři druhy kontaktních vazeb v závislosti na poměru použité vlnové délky a tloušťky vazebního prostředku.

Kontaktní akustická vazba dovoluje bezprostřední styk ultrazvukové sondy se zkoušeným předmětem. Vazební vrstva je mnohem menší než délka vlny. Za vazební prostředek se používá olej, vazelína nebo jiné druhy tuků.

Mezerová akustická vazba má mezi sondou a zkoušeným předmětem malou mezeru, která je vyplněna vazebním prostředím. Za vazební prostředí se používá voda nebo olej. Ve vazebním prostředí se nesmí vytvářet bubliny, které zhoršují průchod ultrazvuku.

Imerzní akustická vazba vytváří mezi sondou a předmětem mnohem větší vrstvu než je délka použité ultrazvukové vlny. Za vazební prostředí se používá olej nebo voda, zkoušený předmět je ponořen do vazební kapaliny.

Při měření doby průchodu si musíme uvědomit, že naměřená hodnota času je ovlivněna vazebním prostředkem, tvarem ultrazvukového signálu, konstrukcí sond apod. Hodnota doby průchodu, se zvýší o tzv. „mrtvý čas“, tj. čas, za který projdou impulsy konstrukcí budiče a vazebním prostředím. Mrtvý čas značený t_{cor} (korekční čas) zjistíme z měření na kalibračním vzorku nazývaném etalon. U etalonu známe časovou charakteristiku t_E .

$$t_{cor} = t_{ME} - t_E \quad (15)$$

Kde:

t_{ME} je doba průchodu ultrazvukového impulsu etalonem [μs]

t_E časová charakteristika etalonu obvykle 0,1 μs

$$t_i = t_L - t_{kor} \quad (16)$$

Kde:

t_i je správná doba průchodu signálu od budiče k měniči

t_L je naměřená hodnota času

2.4. Využití ultrazvukové impulsní metody

V posledních letech dochází k velkému rozšíření aplikace ultrazvuku ve stavebnictví. Je tomu tak, díky rozvoji technologií ve stavebnictví a s tím souvisejícího rozvoje kontroly kvality a jakosti výrobků. Ve stavební praxi mnohdy dochází k porušení postupů a předpisů při stavbě, protože zhotovitel, předpokládá, že pozdější kontrola je finančně nákladná nebo nemožná. V této souvislosti jsou zkoumány možnosti, jak pomocí nedestruktivních zkoušek, tomuto trendu zamezit. Jednou z možností je ultrazvuková impulsní odrazová metoda, jejíž využití ve stavební praxi bude v následujícím textu přiblíženo a popsáno. [6]

2.4.1 Měření tloušťky materiálu [1], [4], [5]

Měření tloušťek materiálu ultrazvukem patří k jednoduššímu uplatnění impulsní metody. Při měření tloušťky zkoušeného vzorku se vychází z předpokladu, že známe rychlost šíření ultrazvukových vlny ve zkoušeném vzorku a ta je přímo úměrná tloušťce při správné

kalibraci ultrazvukového přístroje. Pak tloušťka vzorku je úsek na časové základně mezi počátkem a prvním odrazem ultrazvukové vlny od protilehlé strany vzorku.

Přesnost měření závisí na řadě faktorů jako je tloušťka zkoušeného materiálu, použité sondy a zvoleném rozsahu přístroje. Při vyšších jmenovitých frekvencích je změřená tloušťka přesnější. Sondy vyšších frekvencí 10 až 15 MHz lze použít pro vzorky s hladkým rovinným povrchem bez koroze. V praxi nejsou dost často tyto podmínky splněny a měří se sondami nižších jmenovitých frekvencí 2 až 6 MHz. Při snížení jmenovité frekvence se zvětší vlnové délky, pokles útlumu ultrazvukového vlnění a dochází k větší chybě tloušťky materiálu.

Měření tloušťky si můžeme zpřesnit pomocí metody vícenásobných ech. Ultrazvukový impuls prochází zkoušeným vzorkem neustále tam a zpět, dokud nedojde k jeho úplnému utlumení. Ultrazvukový přístroj registruje každý zpětný odraz, jako samostatné echo pak násobná echa odpovídají násobku tloušťky vzorku. Toho využijeme a na přístroji s větším rozsahem zjistíme vzdálenost násobného echa a vydělíme ho počtem ech obsažených v této vzdálenosti a dostaneme měřenou tloušťku s větší přesností než při přímém odečtení vzdáleností prvního echa.

Uvedená metoda v předchozím odstavci se dá zjednodušit. Při kalibraci ultrazvukového přístroje se většinou zadává rychlost šíření podélných vln ve zkoušeném materiálu, u oceli $c_L = 5920$ m/s, kde z prvního echa odečítáme přímo tloušťku, z druhého echa dvojnásobek tloušťky atd. Jestliže se provádí velký počet měření je tento postup nevýhodný, zdlouhavý a navíc může dojít k chybě způsobené přepočítáváním. Zjednodušení spočívá v tom, že při kalibraci ultrazvukového přístroje zadáme poloviční rychlost šíření podélných vln, pro ocel $c_L/2 = 2960$ m/s a pak čteme z druhého koncového echa přímo tloušťku, můžeme také přístroj kalibrovat pro ocel na $c_L/3 = 1973$ m/s a tloušťku čteme ze třetího koncového echa.

2.4.2 Měření korozního úbytku

Koroze má špatný vliv na stavební konstrukci. Proto je důležité zjistit, jestli nedochází ke korozi a pokud ano tak do jaké míry k ní došlo. Důležité je při tomto měření rozlišit vadu ve zkoušeném vzorku (např. plechu) od korozního úbytku. Využívá se zde stejného principu měření jako u měření tloušťky materiálu. [3]

2.4.3 Zkoušení svarů

Ultrazvukovou impulsní metodu lze využít i pro kontrolu kvality svaru. Svary musí být v konstrukci provedeny kvalitně, jinak dochází k nepředpokládanému namáhání svaru a ten se může porušit, v horším případě přestane plnit svoji funkci. Ze stavebního hlediska se dá využít ultrazvuku pro ocelobetonové spřažené prvky. Kombinace oceli s betonem je elegantní a velice výhodná po stránce namáhání konstrukce. Beton přenáší tlakové namáhání a ocel tahové. Aby beton s ocelí správně spolupůsobil, používá se spřahovacích prvků mezi betonem a ocelí. V takovéto konstrukci je těžké provedení kvality a rozmístění spřahovacích prvků kontrolovat, proto se začalo využívat ultrazvuku, který se v tomto případě osvědčil. Využívá se zde předpokladu, že je svar proveden jako koutový. Ke zkoušce se používá úhlové sondy. Nejvýhodnější je použít 60° úhlovou sondu s jmenovitou frekvencí 4 MHz. Přesněji jsou úhlové sondy rozebrány v kapitole 2.2.4. Přímých sond se dá využít pouze jestli byl spřahovací trn připojen k základnímu materiálu pomocí odporového svařování, výhodná je sonda s piezoelektrickým měničem. Díky odrazové ultrazvukové impulsní metodě, můžeme zjistit nejen kvalitu svaru, ale i počet spřahovacích trnů v konstrukci a to zcela nedestruktivně, což je značně výhodné. [8], [9]

2.4.4 Měření délky kotevních šroubů

I měření délek kotevních šroubů je z hlediska proveditelnosti velice složité, a proto se začalo využívat nedestruktivních metod zkoušení a osvědčila se ultrazvuková metoda. V dnešní době často dochází k záměrnému zkrácení kotevních prvků, kdy bývá kus dřívku uřezán z důvodů nedostačující hloubky k ukotvení apod. Veliké nebezpečí nastává, jestliže dojde k poškození kotvení silničních svodidel či kolejnic. Pomocí ultrazvuku můžeme zjistit i vady kotevních prvků, tyto vady musí být však kolmé na směr paprsku impulsu. Následující experimentální část této bakalářské práce je zaměřená na měření délek a vad v kotevních šroubech. [7]

3 Experimentální část

Cílem experimentální části této bakalářské práce bylo zjistit polohu příčných vad v průřezu ocelových kotevních šroubů pomocí ultrazvukové impulsní metody. A následně poznatky z měření zpracovat a vyhodnotit. K měření byly použity tři sady kotevních šroubů, které se lišily délkou. Jednotlivé délky jsou 200 mm, 270 mm a 1000 mm, průměr kotevního šroubu je 20 mm. Pro experimentální část byl vybrán jeden kotevní šroub od každé délky tj. tři kotevní šrouby.

K měření byl použit ultrazvukový defektoskop SONIC 1200HR. Sondy byly voleny dvě o jmenovitých frekvencích 5 MHz a 10 MHz, jednalo se o přímé piezoelektrické sondy.

3.2. Měření

3.2.1 Zkušební kotevní šrouby

Jak je již výše zmíněno, pro účely této bakalářské práce bylo vybráno po jednom kotevním šroubu z každé sady. Sady byly pojmenovány A, B, C a vybrané kotevní šrouby byly označeny 1, 2, 3. Jednotlivé sady jsou vyfoceny na níže uvedených fotkách. Vady na kotevních šroubech byly vyrobeny uměle pomocí brusky, byly umístěny kolmo k ose paprsku ultrazvuku. Vada oslabila průřez maximálně o 25 % z plochy průřezu tyče.



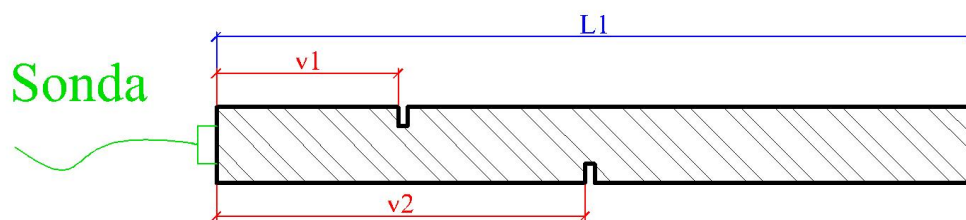
Obr. 17 Kotevní šroub 1, sada A



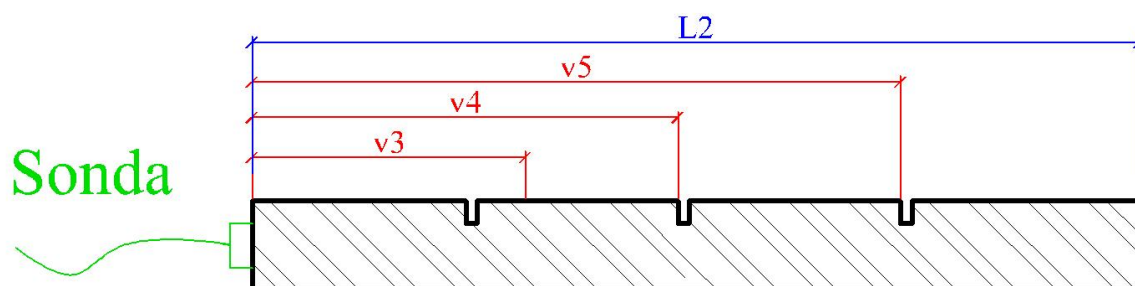
Obr. 18 Kotevní šroub 2, Sada B



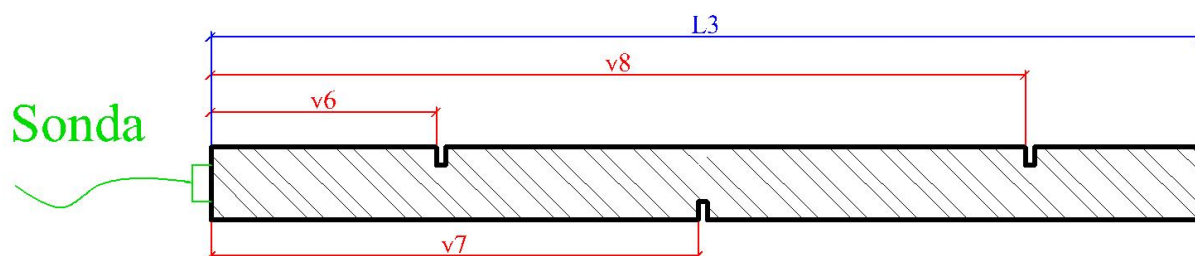
Obr. 19 Kotevní šroub 3, SADA C, detail vady na šroubu



Obr. 20 Znázornění vad na kotevním šroubu 1



Obr. 21 Znázornění vad na kotevním šroubu 2



Obr. 22 Znázornění vad na kotevním šroubu 3

3.2.2 Ultrazvukové sondy

Pro účel této zkoušky byly vybrány dvě přímé piezoelektrické sondy o jmenovitých frekvencích 5 MHz a 10 MHz od firmy Staveley instruments inc, zobrazeny na obr. 20. Teoretický základ o sondách byl uveden v kapitole 2.2.5. Charakteristika použitých sond je uvedena v Tab. 1.

Tab. 1 charakteristika sond

f [MHz]	D_m [mm]	D_{ef} [mm]	φ [°]	N [mm]
5,00	12,70	12,3190	20,82	32,04
10,00	6,35	6,1595	20,82	16,02

Kde:

- D_{ef} efektivní průměr měniče
 D_m jmenovitý průměr měniče
f jmenovitá frekvence sondy
N délka blízkého pole sondy
 φ úhel rozšíření akustického svazku



Obr. 23 Přímé sondy o frekvenci 5 MHz a 10 MHz

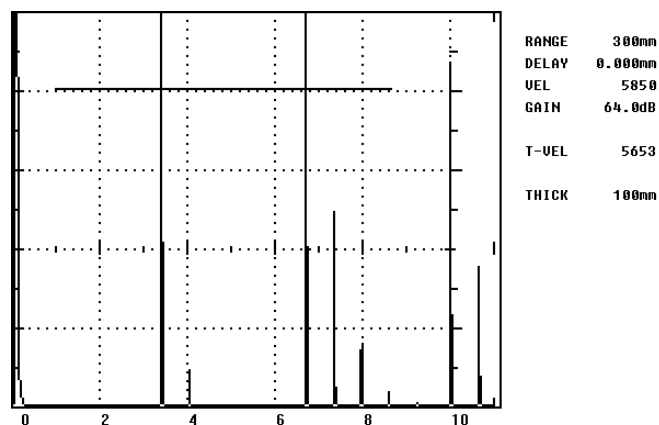
3.2.3 Ultrazvukový defektoskop a jeho kalibrace

Měření probíhalo pomocí ultrazvukového impulsového defektoskopu SONIC 1200 HR, který se musel před samotným měřením nakalibrovat pro požadovaný rozsah. Přístroj byl nastaven pomocí kalibrační měřky č. 1. O kalibračních měrkách bylo pojednáno v kapitole 2.3.4. Za akustický vazební prostředek byl použit speciální gel. Na přístroji se nastavila rychlost šíření příčných vln c_L . Ke každému kotevnímu šroubu se postupně přiložila ultrazvuková sonda 5MHz a 10 MHz. Na obrazovce ultrazvukového přístroje se zobrazil echogram. Z echogramu se zjistila vzdálenost vad a délka zkoušeného kotevního šroubu. Ultrazvukový defektoskop byl připojen k počítači pro zaznamenání jednotlivých echogramů v počítačové podobě.

Celé měření bylo prováděno dle norem pro nedestruktivní zkoušení pomocí ultrazvukového defektoskopu. Podm



Obr. 24 Ultrazvukový defektoskop SONIC 1200HR při kalibraci pomocí kalibrační měřky č. 1



Obr. 25 Kalibrační echogram ultrazvukového přístroje na kalibrační měrce č. 1

3.3. Výsledky a jejich zpracování

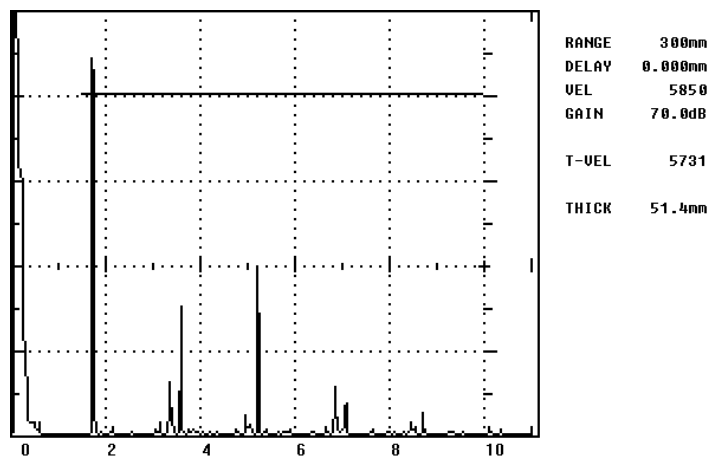
V následující části je tab. 3, kde jsou zaznamenány výsledky z měření a v další části jsou ukázány jednotlivé echogramy s podrobným popisem.

Tab. 2 Naměřené hodnoty

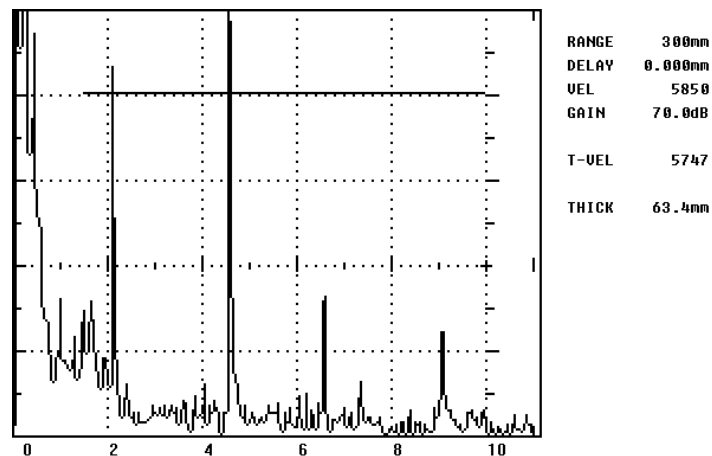
	frekvence sondy [MHz]	Vzdálenost vady naměřené ultrazvukovým defektoskopem [mm]								celková délka tyče naměřená ultrazvukem [mm]	c _L rychlost podélných vln [mm]
		Vada 1	Vada 2	Vada 3	Vada 4	Vada 5	Vada 6	Vada 7	Vada 8		
kotevní šroub 1	5,00	51,40	99,20							202,50	5731
	10,00	49,89	98,50							202,48	5731
kotevní šroub 2	5,00			63,40	132,85	222,12				269,55	5780
	10,00			63,72	133,20	222,45				269,56	5780
kotevní šroub 3	5,00						115,98	422,10	727,20	1004,00	5843
	10,00						116,00	421,89	726,85	1004,00	5843

Tab. 3 Rozdíl vzdáleností

	frekvence sondy [MHz]	vzdálenost vady měřená pomocí ultrazvukového defektoskopu [mm]	vzdálenost vady měřená posuvným měřidlem nebo metrem [mm]	rozdíl vzdáleností [mm]
Vada 1	5,00	51,4	48,14	3,26
	10,00	48,89	47,14	1,75
Vada 2	5,00	99,2	97,55	1,65
	10,00	98,50	97,55	0,95
Vada 3	5,00	63,4	61,26	2,14
	10,00	63,72	61,90	1,82
Vada 4	5,00	132,85	132,9	-0,05
	10,00	133,20	132,98	0,22
Vada 5	5,00	222,12	221,98	0,14
	10,00	222,45	221,98	0,47
Vada 6	5,00	115,98	115,05	0,93
	10,00	116,00	115,05	0,95
Vada 7	5,00	422,1	422,08	0,02
	10,00	421,89	422,08	-0,19
Vada 8	5,00	727,2	725,45	1,75
	10,00	726,86	725,46	1,40

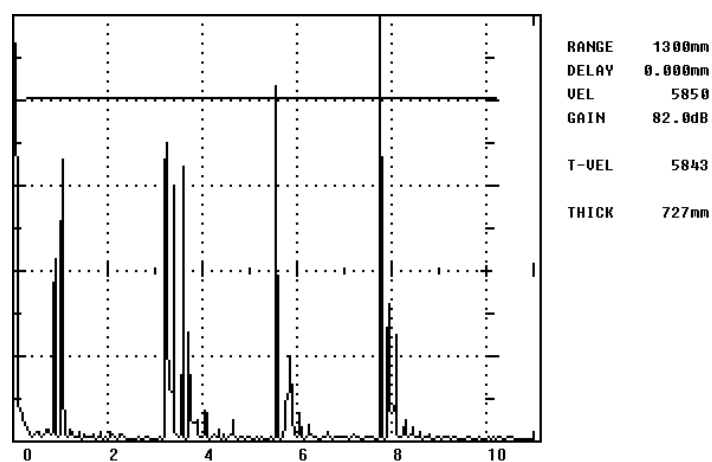
Echogramy při použití 5 MHz sondy**Obr. 26** Echogram kotevního šroubu 1

Nastavení: kalibrace úroveň šumu na 20% rastru, registrační úroveň 40% rastru, zesílení +6db, $c_L = 5731$ m/s (T-VEL), měřený rozsah přístroje 300 mm, vzdálenost vstupního a 1. odraženého echa = 51,4 mm (vada 1 značená na Obr. 20 jako v1), vzdálenost vstupního a koncového echa = 204,0 mm



Obr. 27 Echogram kotevního šroubu 2

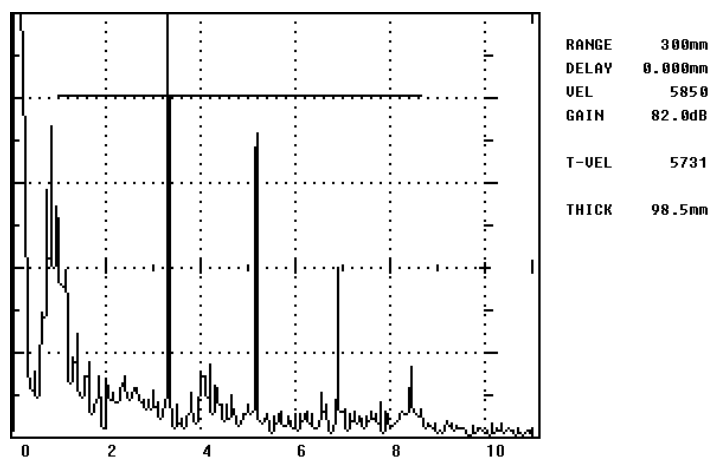
Nastavení: kalibrace úroveň šumu na 20% rastru, registrační úroveň 80% rastru, zesílení +6dB, $c_L = 5747$ m/s měřený rozsah přístroje 300 mm, vzdálenost vstupního a 1. Odraženého echa = 63,4 mm, (vada v5) vzdálenost vstupního koncového echa = 270,0 mm



Obr. 28 Echogram kotevního šroubu 3

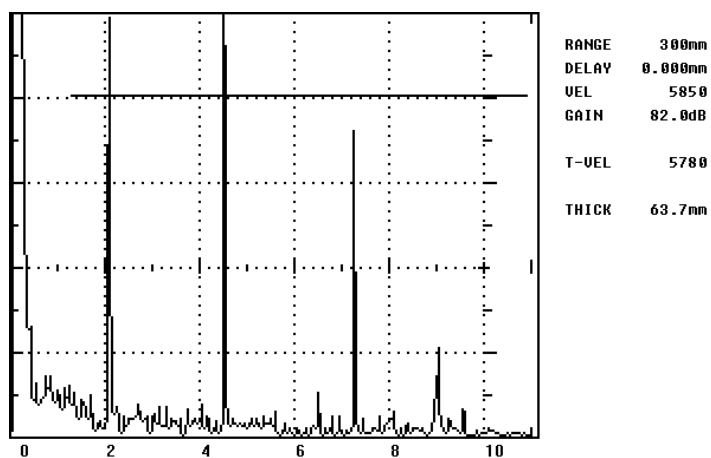
Nastavení: kalibrace úroveň šumu na 20% rastru, registrační úroveň 80% rastru, zesílení +12dB, $c_L = 5843$ m/s měřený rozsah přístroje 1294 mm, vzdálenost vstupního a 1. Odraženého echa = 727,0 mm (vada v8), vzdálenost vstupního koncového echa = 1008,0 mm

Echogramy při použití 10 MHz sondy



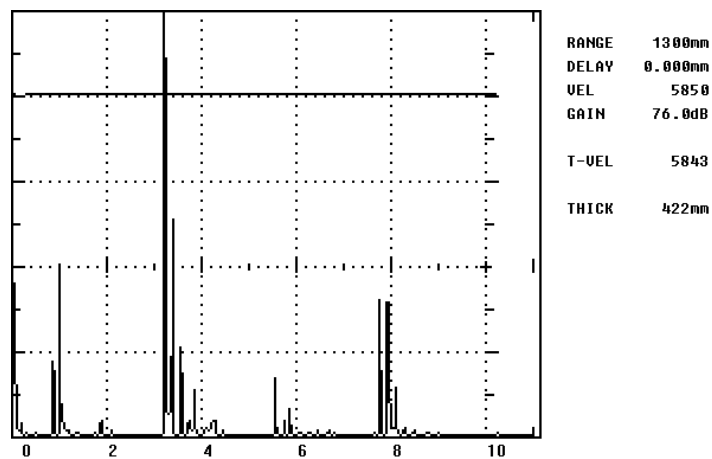
Obr. 29 Echogram kotevního šroubu 1

Nastavení: kalibrace úroveň šumu na 20% rastru, registrační úroveň 80% rastru, zesílení +12db, $c_L = 5731$ m/s, měřený rozsah přístroje 300 mm, vzdálenost vstupního a 1. odraženého echa = 98,5 mm (vada v2), vzdálenost vstupního a koncového echa = 204,0 mm



Obr. 30 Echogram kotevního šroubu 2

Nastavení: kalibrace úroveň šumu na 20% rastru, registrační úroveň 80% rastru, zesílení +12dB, $c_L = 5780$ m/s měřený rozsah přístroje 300 mm, vzdálenost vstupního a 1. Odraženého echa = 63,7 mm,(vada v3) vzdálenost vstupního koncového echa = 270,0 mm



Obr. 31 Echogram kotevního šroubu 3

Nastavení: kalibrace úroveň šumu na 20% rastru, registrační úroveň 80% rastru, zesílení +12dB, $c_L = 5843$ m/s měřený rozsah přístroje 1294 mm, vzdálenost vstupního a 1. Odraženého echa = 422,0 mm (vada v7), vzdálenost vstupního koncového echa = 1008,0 mm

4 Závěr

Z výsledků experimentální části měření můžeme usoudit, že ultrazvuková impulsní odrazová metoda se osvědčila pro dostatečně přesné zjištění délek i vzdáleností vad kotevních šroubů a dá se tak aplikovat, na jakékoliv ocelové tyčové prvky, které přenášejí tahovou sílu. Nejlépe to lze pozorovat z Tab. 3, kde jsou uvedené hodnoty vzdáleností vad měřené pomocí ultrazvuku a pomocí posuvného měřidla a metru. Výsledné rozdíly mezi těmito hodnotami, jsou v rámci délky kotevních šroubů malé. Dosah impulsní metody pro určení vady závisí na jmenovité frekvenci sondy. Při měření se prokázalo, že v praxi běžně používané sondy o frekvenci 5 MHz a 10MHz se dají použít pro zjištění vad na delších kotvících tyčových prvcích.

Využívání výše uvedené metody je velice výhodné a to z hlediska nízké finanční náročnosti oproti jiným používaným metodám, dále její jednoduchosti a hlavně její přesnosti. Navíc se jedná o zkoušení nedestruktivní, což je beze sporu další z mnoha výhodou co tato metoda poskytuje. V budoucnu se jistě dočkáme dalších možností využití ultrazvukových impulsních odrazových metod v oboru stavebnictví.

5 Seznam použité literatury

- [1] OBRAZ, Jaroslav. *Ultrazvuk v měřicí technice*. Praha: SNTL, 1976.
- [2] REGAZZOVÁ, Marcela a Richard REGAZZO. Základy ultrazvuku. *NDT welding bulletin*.
- [3] REGAZZOVÁ, Marcela, Richard REGAZZO a Pavel PROS. Rozlišení korozního úbytku materiálu od vnitřních vad plechů ultrazvukem. *NDT welding bulletin*. 1997.
- [4] REGAZZOVÁ, Marcela, Richard REGAZZO, Pavel PROS a NECKÁŘ. Zjednodušené měření tloušťky materiálu ultrazvukem podle násobných ech. *NDT welding bulletin*. 1999.
- [5] REGAZZOVÁ, Marcela, Richard REGAZZO. Měření tloušťky materiálu ultrazvukem. *NDT welding bulletin*. 1996.
- [6] HOBST, Leonard, VÍTEK, Lubomír, LÁNÍK, Jaromír, KOUDELKA, Martin. Možnosti využití ultrazvukové impulsní metody ve stavební praxi. Zkoušení a jakost ve stavebnictví 2009, ISBN 978-80-214-3951-1
- [7] HOBST, Leonard, VÍTEK, Lubomír. Ověřování délky kotevních šroubů v masivních konstrukcích ultrazvukovou metodou. Soudní inženýrství. 2007, roč. 18, č. 2, s. 97 – 99, ISSN 1211 - 443X.
- [8] HOBST, Leonard, Lubomír VÍTEK a Jaromír LÁNÍK. Speciální případy kvality připojení spřahovacích trnů. 2009.
- [9] HOBST, Leonard, Lubomír VÍTEK a Jaromír LÁNÍK. Metodika zkoušení kvality připojení ocelových spřahovacích prvků ultrazvukovým defektoskopem. 2008.
- [10] Www.ultrazvuk.cz. Stránky o ultrazvuku [online]. [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.ultrazvuk.cz/prilohy/38/historie.mht>
- [11] [online]. [cit. 2013-05-24]. Dostupné z: <http://ulozto.cz/xE46juh/06-ultrazvuk-1-fyzikalni-zaklady-2011-ppt>
- [12] [online]. [cit. 2013-05-24]. Dostupné z: <http://ulozto.cz/xXPdp8i/07-ultrazvuk-2-pristrojove-vybaveni-ut-sondy-2011-ppt>